

論文 コンクリートの急速塩分浸透性試験による塩化物イオン拡散係数の算定について

渡辺 豊*¹・河野 広隆*²・渡辺 博志*³

要旨：コンクリートの塩化物イオン拡散係数を短時間で簡易に求めることを目的として、電気泳動を利用した塩分浸透性試験方法の改良について検討を行った。本研究では、化学分析を行わなくても測定可能な通電後の供試体の塩分浸透深さに着目し、その移動速度から塩化物イオン拡散係数を求めた。本手法で得られる塩化物イオン拡散係数と、別途実施した塩水浸漬試験で得られる拡散係数を比較し、本手法で得られる拡散係数が妥当な結果を与えることを検証した。また、供試体に印加する電位勾配やNaCl溶液の濃度といった試験条件の設定が試験結果に及ぼす影響についても検討した。

キーワード：急速塩分浸透性試験、塩化物イオン、塩化物イオン拡散係数

1. はじめに

コンクリート構造物の塩害耐久性を照査するためには、コンクリート中への塩化物イオンの浸透を予測する必要がある。この予測に当たっては、コンクリートの塩化物イオン拡散係数を把握しなければならない。しかし、塩化物イオン拡散係数を通常の塩水浸漬試験で求めると、長時間の試験期間を要し、この短縮が課題となっている。

この解決策の一つとして電氣的泳動を用いた急速塩分浸透性試験（以下 RCPT）が、ASTM C 1202 や AASHTO T 277 で規定されている。これは通過電流量により塩化物イオン浸透性を定性的に評価するものである。ところが、通過電流量には塩化物イオン以外のイオンの移動も反映されることから、塩化物イオンのみの浸透性を評価したものではなく、通過電流量を尺度として塩化物イオン拡散係数を定量的に評価することは難しいと考える¹⁾。

一方、塩化物イオン拡散係数を直接求めるためには、同様の促進試験において定常状態にお

ける塩化物イオンのフラックスを測定する方法も試みられている。しかし、この方法では塩化物イオンのフラックスを求めるために陽極側の溶液中の塩化物イオン量の経時的变化を化学分析により把握する必要があることや、試験に要する日数も長くなるなどから試験方法のさらなる簡素化が望まれている。

ここでは、通過電流量によって評価を行う従来法とは異なり、RCPTにおいて所定の時間通電した供試体を割裂し、割裂面に硝酸銀溶液を噴霧して供試体の塩化物イオン浸透深さを測定し、この測定値から塩化物イオン拡散係数を求める方法を試みた。この方法では、塩化物イオンの化学分析が不要なため試験方法が簡易になると共に、着目している塩化物イオンの移動を直接捉えられる長所を有している。本研究では、このような簡易な促進試験方法で妥当な塩化物イオン拡散係数が得られるかどうか検討を行った。

また、適切な試験条件を明らかにすることを目的として、特に供試体に印加する電位勾配と

*1 独立行政法人土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 交流研究員 (正会員)

*2 独立行政法人土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 主席研究員 工修 (正会員)

*3 独立行政法人土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 工修 (正会員)

用いる NaCl 溶液の濃度について取り上げ、これらの試験条件が塩化物イオン拡散係数の測定値に及ぼす影響について調べた。

2. 実験概要

2.1 供試体の製作

コンクリートの配合は表-1 に示す通り単位水量を一定に保ち、水セメント比を 25 % から 55 % に変化させた。使用したセメントは早強ポルトランドセメントとしたが、一部の供試体は高炉スラグ微粉末（ブレン値 6000cm²/g）を混和材として用いた。高炉スラグ微粉末の置換

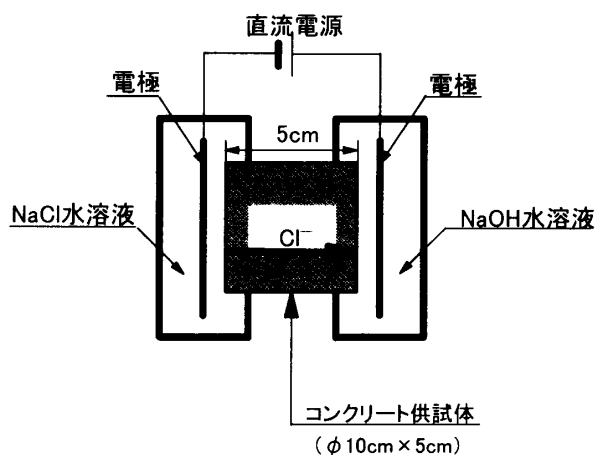


図-1 急速塩分浸透性試験の概略

表-1 コンクリートの配合

記号	水セメント比 (%)	高炉スラグ微粉末置換率 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント C	高炉スラグ微粉末 BF	細骨材 S	粗骨材 G
H25	25	—	45	160	640	—	694	865
H30	30	—	45	160	533	—	734	915
H40	40	—	45	160	400	—	784	977
H55	55	—	45	160	291	—	825	1028
BF50	40	50	45	160	200	200	777	968
BF70	40	70	45	160	120	280	775	965

表-2 フレッシュコンクリートの性状及び硬化コンクリート (材齢28日) の強度試験結果

率は 50 % と 70 % の 2 水準とした。コンクリートの基本性状を表-2 に示す。塩水浸漬試験用供試体は、φ 10cm×10cm で打設を行い、RCPT 供試体用は、φ 10cm

記号	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
H25	22	39/35	1.4	91.5	41.1
H30	21	40/36	3.7	82.1	40.9
H40	11	—	3.8	65.6	39.2
H55	5	—	2.9	44.8	35.2
BF50	14	—	2.4	71.5	39.5
BF70	11	—	2.0	63.8	39.2

× 6cm で打設して試験時に打設面から 1cm を除去して φ 10cm × 5cm とした。

2.2 試験方法

(1) 塩水浸漬試験

供試体は、4 週間 20 °C の水中養生後、塩水中に浸漬した。塩水の浸漬を 1 方向からとするために打設面及び側面をエポキシ樹脂でコーティングした。浸漬 13 週後に浸漬面から 1cm 毎にスライスして全塩化物量を JCI-SC4 に基づいて測定した。

表-3 RCPT の試験条件

記号	NaCl 溶液濃度 (%)	電位勾配 (V/cm)		通電時間 (時間)
		8週材齢	17週材齢	
H25	5	2.4 4.8 12	2.4 7.2 12	6 15 30
H30	5			
H40	1,5,10			
H55	5			
BF50	1,5,10			
BF70	5			

(2) 急速塩分浸透性試験 (RCPT)

打設後 8 週間及び 17 週間 20 °C の水中養生後、厚さ 5cm の円盤状に切断し、ASTM 及び AASHTO に準じて真空飽水処理を行った。実験装置

の概略を図-1に示す。陰極側を NaCl 溶液 (250 cc) とし陽極側は 0.3N-NaOH (250cc) 溶液とした。

なお、試験条件は表-3の通りとし、通电後にコンクリート供試体を割裂して割裂面に硝酸銀溶液を噴霧し、塩化物イオン浸透深さを測定した。

3. コンクリートの塩化物イオン拡散係数の算定

電位勾配の存在下での塩化物イオンの移動が Nernst-Einstein の式に従うと仮定すると、単位時間当たりのコンクリート中の単位面積を流れる塩化物イオン (J) は、移流項を無視すると次式で与えられる。

$$J = -Dc \frac{\partial c}{\partial x} + Dc \frac{zF}{RT} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (1)$$

ここで、Dc：拡散係数、c：塩化物イオン濃度、 ϕ ：電位、z：価数、F：ファラデー定数

ここで、電気泳動項（第2項）が通常の拡散項（第1項）よりも卓越していると考え、拡散項を無視すると、供試体中の塩分含有量の変化は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{zF}{RT} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + Dc \frac{zF}{RT} \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2)$$

ここで、電位勾配が線形的に変化すると仮定すると、第1項を無視して、

$$\frac{\partial c}{\partial t} - Dc \frac{zF}{RT} \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

この式は、イオンの電気泳動が卓越する場合は、ある濃度の場所は、時間と共に速さ k

$$k = Dc \frac{zF}{RT} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (4)$$

で移動することを意味している。

従って、硝酸銀溶液の発色フロントでの塩化物イオン濃度が一定であると仮定すると、この移動速度を実験で求めることにより、kが得ら

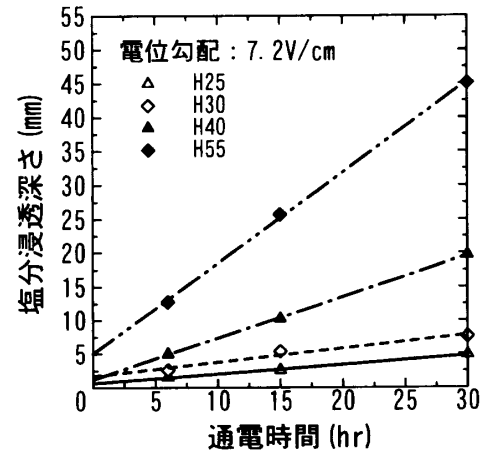


図-2 RCPTで得られた通电時間と塩分浸透深さの関係

れ、さらに Dc が求められる。

4. 実験結果と考察

4.1 通电による塩化物イオンの浸透

式(4)を元に Dc を評価する場合、通电による塩化物イオンの浸透速度が一定であることが前提となる。すなわち、硝酸銀溶液を噴霧して測定される塩化物イオン浸透深さは、通电時間と比例していなければならない。

図-2は17週材齢における通电時間と塩化物イオン浸透深さの関係を示したものである。図からわかる通り通电時間と塩化物イオンの浸透深さの間には線形性が認められるものの原点を通る直線とはなっておらず、配合条件によって切片の値が異なる結果となった。原点を通る直線とならなかった理由は、明確には出来なかった。

ここでは、塩化物イオン浸透深さの移動速度については切片の値を無視し、異なる3つの通电時間で測定した塩化物イオン浸透深さと通电時間の関係を線形回帰した。その結果得られた回帰直線の傾きを塩化物イオン浸透の移動速度 k とし(4)式に代入して、Dc の算定に用いることとした。

4.2 急速塩分浸透性試験において電位勾配を変化させた場合の Dc の比較

供試体に印加する電位勾配は大きくした方が

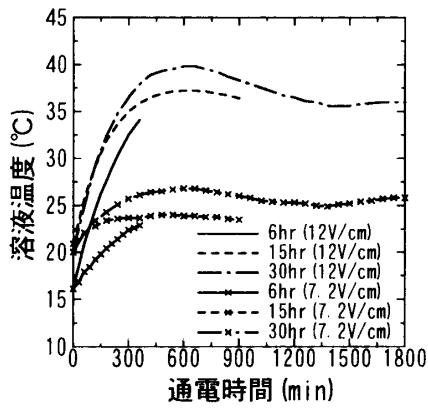


図-3 通电時間と溶液温度 (H40) の関係

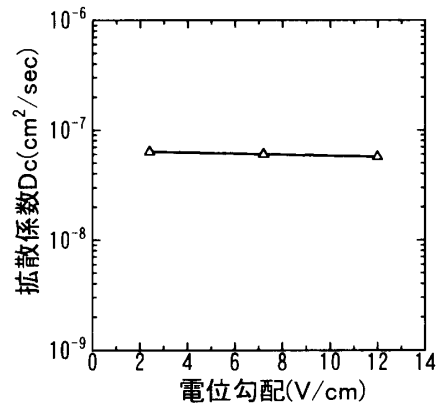


図-5 電位勾配とDcの関係 (H40)

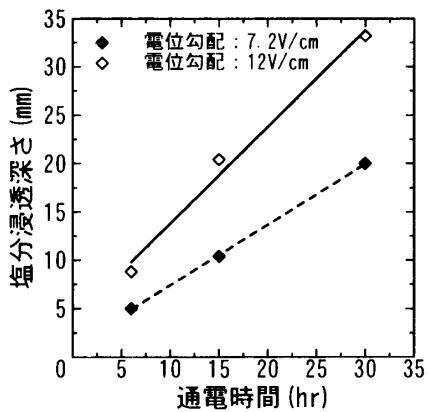


図-4 通电時間と塩分浸透深さ (H40)

塩化物イオンの移動速度が大きくなるので促進効果は高くなり、試験時間の短縮につながる。また、通电後の塩化物イオンの浸透深さが大きくなるので、浸透深さの測定において誤差の介入も小さくなり好ましい。

しかし、一方で、電位勾配を大きくした場合、試験操作に危険が伴うと共に長時間の通电により溶液の温度が上昇し、得られる Dc が大きくなる」といった問題点も生じる。ここでは、適切な電位勾配の目安を得るため、同一条件のコンクリート供試体について異なる電位勾配を与え、その影響について検討を行った。

ここでは、17 週材齢において、図-3 に電位勾配と通电時間に対する溶液温度の関係を示し、図-4 にその条件の塩化物イオン浸透深さを表す。図-5 は異なる電位勾配を与えた場合に求められた Dc の値を示したものである。

電位勾配が 12V/cm の場合、通电時間 6、15、30 時間のそれぞれの溶液の平均温度は、26.8、

4.3、36.1 °C であり、試験開始からの最大温度上昇量は約 20 °C であった。それに対し、電位勾配 7.2V/cm の場合はそれぞれ 20.1、23.5、24.5 °C であり、試験開始からの最大温度上昇量は約 8 °C にとどまっていた、温度上昇がかなり小さく抑えられている。

図-4 を見ると、電位勾配が 12V/cm の場合は、異なる通电時間で測定された塩化物イオン浸透深さはやや直線性が悪くなっていて、相対的にみると平均温度が明らかに低かった 6 時間通电の場合で、塩化物イオンの浸透深さは回帰式で算定される値よりも小さくなっている。それに対して、電位勾配が 7.2V/cm の場合は通电時間と塩化物イオン浸透深さの間の直線性が向上している。

ただし、図-5 に示した結果を見ても分かるように Dc の値はいずれの電位勾配を与えても

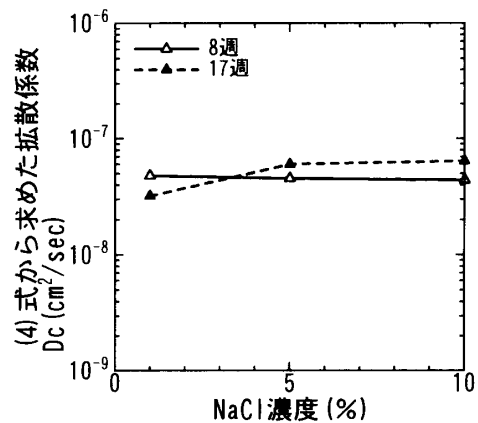


図-6 RCPTにおけるNaCl濃度とDcとの関係 (H40)

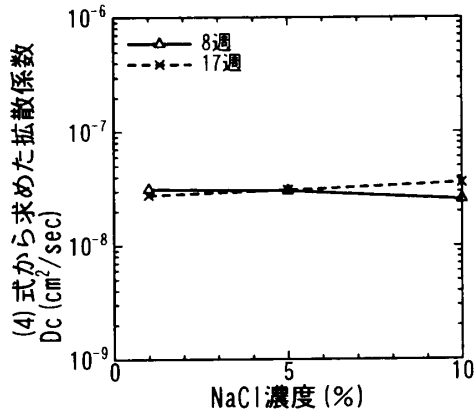


図-7 RCPT におけるNaCl濃度とDcとの関係 (BF50)

ほとんど同じであった。

以上の結果をまとめると、30 時間程度の通電であれば電位勾配を 12V/cm にしても通電に伴う温度上昇量が最大で 20 °C 程度に抑えられれば塩化物イオン浸透深さと通電の間の Dc の算定値に与える影響はほとんどないと言える。

4.3 急速塩分浸透性試験においてNaCl溶液濃度を变化させた場合の Dc の比較

H40 と BF50 の配合について陰極側の NaCl 溶液濃度を 1, 5, 10 % と変化させた場合について Dc の測定結果を図-6, 図-7 に示す。これらより RCPT では NaCl 溶液濃度の違いによる Dc の差がほとんどないことがわかった。

4.4 Dcへ及ぼすW/C及び高炉スラグ微粉末の影響について

図-8 に早強セメントを用いた供試体について、材齢 8 週及び 17 週での Dc を求めた結果を示す。

図-8 に示す通り W/C の低下に伴って、得られる Dc の値は小さくなっていて、定性的には W/C の影響を正しく表現していると考えられる。W/C が 40 % 及び 55 % の場合、水中養生期間の増加による Dc の低下はほとんどなかったが、W/C が 30 %, 25 % の場合は Dc の値が 17 週の方が低下していた。これは養生期間中に水和が進行したことが原因の一つと思われる。

また、図-8 には 17 週材齢における塩水浸漬試験結果から Fick の拡散式より求めた Dc も

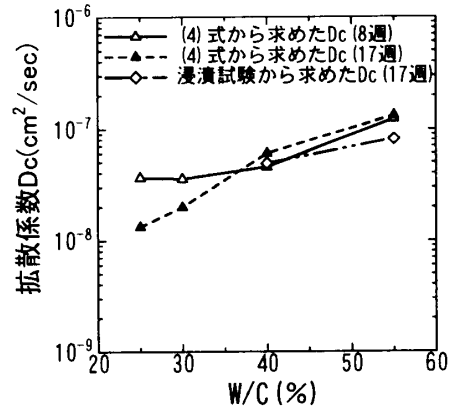


図-8 本手法で求めたDc (17週) と浸漬試験 (17週) で求めたDcの比較

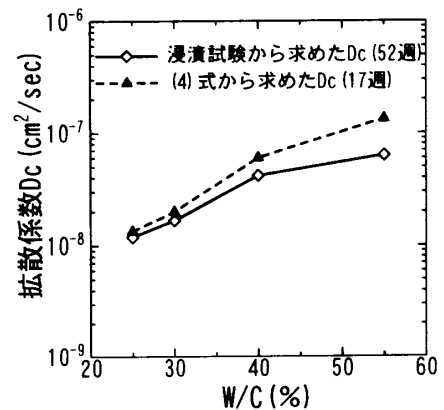


図-9 本手法で求めたDc (17週) と浸漬試験 (52週) で求めたDcの比較

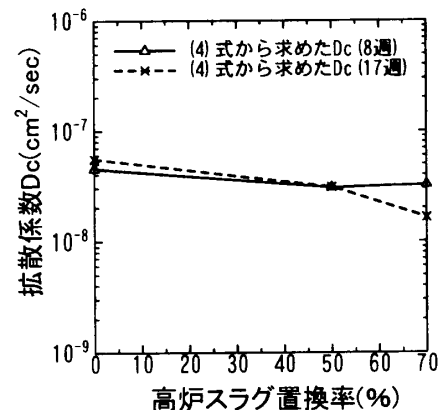


図-10 高炉スラグ置換率と(4)式で求めた Dcとの関係

載せた。今回の塩水浸漬試験では浸漬時間が短く低水セメント比の供試体では塩分浸透が少なかった。このため W/C が 40 % と 55 % でしか Dc が得られなかったが、この範囲では比較的両者の値は一致している。なお、参考までに同一の W/C 及び単位水量で、使用した骨材の産

地のみ異なるコンクリートで 52 週間塩水浸漬試験を行って得られた D_c を図-9 に示す。両者の間では使用骨材が違ふと共に D_c を求めた材齢が異なっているので、厳密には同一の条件ではない。しかし、W/C の低下に伴う D_c の減少程度は比較的良く一致している。W/C が 40 % 以下の低水セメント比の領域でも適切な D_c が得られる可能性があると考えられる。

図-10では高炉スラグ微粉末の置換率を変えたときの D_c を表したものである。結果を見ると、材齢 8 週では明確ではないが、材齢 17 週では早強ポルトランドセメントのみの配合に対して高炉スラグ微粉末を置換した方が D_c は小さい値を示している。これは既研究^{1) 5)}より明らかのように、高炉スラグ微粉末を添加することにより細孔組織が緻密化し、塩化物イオンの浸透性を小さくするためであると考えられる。

5. まとめ

今回は、コンクリートの塩分浸透性の促進試験として RCPT を取り上げ、塩化物イオン浸透深さから塩化物イオン拡散係数を算定する方法を提案した。その結果を以下に示す。

- (1) 通電による供試体中への塩化物イオンの浸透深さと通電時間の間には直線関係が見られた。ただし、両者の間には比例関係が成り立つわけではなく、切片の値は 0 とはならない。従って、塩化物イオンの浸透フロントの移動速度を求めるためには、通電時間を変えた少なくとも 2 点での測定値を用いる必要がある。
- (2) 通電時の電位勾配を 12V/cm まで増加させて塩化物イオン拡散係数を求めたが、得られる結果に及ぼす影響は小さかった。従って、塩化物イオン浸透深さの誤差や促進効果の観点からすると、印加電圧は 12V/cm まで増加させても良いと考えられる。ただし、電位勾配を大きくすると通電に伴う温度上昇量も大きくなるので、過度に電位勾配を大きくすることは好ましくないと考える。
- (3) 陰極側の NaCl 溶液の濃度を変えても、得

られる塩化物イオン拡散係数の値にはほとんど影響はなかった。これは、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートにも同様の結果が得られた。

- (4) W/C を変化させたコンクリート供試体を用いて今回の促進方法で求められる塩化物イオン拡散係数と塩水中の浸漬試験によって求めた塩化物イオン拡散係数は、比較的近い値を示していた。このことから、今回実施した簡易な促進試験方法によっても塩化物イオン拡散係数を定量的に評価できる可能性があると考えられる。
- (5) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートを水中養生 17 週後に RCPT を実施したところ、高炉スラグ微粉末の置換率を上げることにより塩化物イオン拡散係数が小さくなる結果が得られ、高炉スラグ微粉末の使用の有効性を確認することが出来た。

参考文献

- 1) 杉山隆文ほか：コンクリート中の電気伝導現象における塩化物イオンの役割，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.511-516，2001
- 2) 長岡 覚ほか：コンクリート中の塩素イオンの電氣的泳動を利用した急速塩分浸透試験，土木学会第 50 回年次学術講演会，pp.282-283，1995.9
- 3) 国土交通省土木研究所，(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：現場打ち高強度コンクリート部材の設計施工法に関する共同研究報告書，第 266 号，2001.3
- 4) 久田 真ほか：通電によるモルタル中のイオンの移動に及ぼす諸要因の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.907-912，1995
- 5) 田島孝敏ほか：電氣的手法によるコンクリートの劣化促進試験 その 1. 各種セメントの劣化特性について，土木学会第 49 回年次学術講演会，pp.486-487，1994.9